2001년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집 (2001.11.16~17)

EMTDC용 1차 에너지계 모델(TGOV5) 개발

허진* 김동준* 윤재영* 문영환* 이진** 윤용범***
한국전기연구원* LG산전** 한전전력연구원***

The development of TGOV5 model representing a steam turbine and boiler for implementation into EMTDC

J. Hur* D.J. Kim* J.Y. Yoon* Y.H. Moon* J. Lee** Y.B. Yoon***
KERI* LGIS** KEPRI***

Abstract - In general, the PSS/E program based on RMS mathematical models is used for analyzing the steady state and transient stability phenomena of full-scale large power system. Whereas, the EMTDC program unlike PSS/E, studies the specific reduced small-scale power systems as a basis of instantaneous value mathematical models and used to analyze the Electro-Magnetic transient characteristics. The PSS/E provides various control models such as exciter, governor, PSS models and TGOV5 model, but there are few control models in EMTDC. In this paper, we developed EMTDC model for TGOV5 of a steam turbine and boiler which represents governor action, main, reheat and low-pressure effects, including boiler effects. The EMTDC model is developed by examining PSS/E control block and using User Define Model(UDM) in addition to default.lib provided by EMTDC. We verify the correctness of developed TGOV5 model with PSS/E and EMTDC simulation results using Governor Step(GSTEP) method.

1. 서 론

현재 한전계통 안정도 해석에 실효치 해석 프로그램인 PSS/E가 많이 이용되고 있으며 계통의 과도 특성 검토를 위해서는 EMTDC(Electro-Magnetic Transient DC)가 필요하다. 그러나 유닉스 시스템을 기반으로 하는 EMTDC에는 PSS/E와 달리 한전 계통에 적용 가능한 각종 제어기 모델이 거의 전무한 상태이다. EMTDC에서 사용할 수 있는 제어기 모델은 여자기 경우 SCRX19 1기 모델, 조속기 경우 HGOV19 1기 모델 그리고 PSS(Power System Stabilizer) 경우는 해당 제어기 모델이 존재하지 않는다. 그러므로 EMTDC상에서 한전계통을 모의하는데 많은 제약이 따른다. 한전계통을 포함하여 계통의 과도특성을 모의하기 위해 PSS/E 모델을 대상 기준으로 1차 에너지계 모델인 TGOV5 모델을 포함하여 여자기 14기 모델[1], 조속기 6기 모델[2], PSS 4기 모델, 고전적 발전기 모델(GENCLS) 그리고 부하모델 등 총 27개의 EMTDC용 제어기 모델을 개발하였다.

본 논문에서는 한전계통 모의 시 활용되고 있는 PSS/E 제어기 모델 중 보일러 특성을 포함하는 1차 에너지계 모델인 TGOV5 모델을 EMTDC용으로 개발하였다. EMTDC용 TGOV5 모델 개발 과정은 우선 PSS/E의 기본 제어블록을 분석하여 크게 세 부분으로 구분 할 수 있다. TGOV5 모델의 조속기 부분, 연료 및 보일러 부분 그리고 압력지정 및 부하기준 제어 부분으로 나누어 제어기 모델을 개발하였다. 또한 EMTDC의 기본 라이브러리(default.lib)를 중심으로 PSS/E 입력 파라미터와 동일하게 사용할 수 있도록 사용자 정의모델(User Define Model, 이하 UDM)을 개발하여 새로운 라이브러리를 구축하였다. 구축된 라이브러리를 이용하여 제어블록 형태의 TGOV5 모델을 개발하였다.

EMTDC용 TGOV5 모델의 검증은 조속기 모델 검증에 사용되었던 GSTEP(Governor Step) 방법[2]을 EMTDC에서 모의하여 PSS/E와 EMTDC의 시뮬레이션 결과를 비교하여 개발모델의 성능을 검증하였다.

2. 1차 에너지 시스템 개요

1991년 IEEE 위원회에서는 화력터빈에 대하여 특수 제어로직과 보일러 영향을 고려한 터빈 에너지 계통의 상세 모델을 제시하였다. 모델들은 외란의 영향, 특히 과도한 원동기 제어동작의 영향을 해석하기 위해 1초 이하로부터 수 분에 걸쳐 원동기 기계적 출력의 동특성을 나타낼 수 있어야 한다. 이렇게 되면 제어동작은 조속기 계통의 선형영역 뿐 아니라 전력/부하 불균형 계전기, 비상 속도제어, 고속 밸빙, 시작 압력조정장치 등의 동작이 가능하게 된다. 전체 전력계통과 원동기 시스템과의 기능관계를 간략한 블록선도를 표시하면 그림 1과 같다.

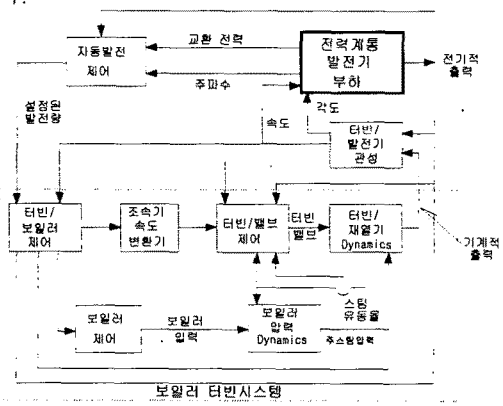

그림 1 원동기 시스템 제어의 기능 블록도

그림 1에서 점선내 부분은 원동기/에너지 공급시스템으로서 수동/자동 발전제어(Automatic Generation Control) 신호 및 속도편차로부터 출력을 조정한다. 그림 1에 나타난 바와 같이 기계적 출력에 영향을 주는 것은 플랜트 변수로 터빈 밸브와 보일러 주증기 압력이다. 제어와 인터셉트 밸브에 대한 터빈의 제어로직은 주로 속도편차에 작용한다. 그러나 주증기 압력(시작압력 조정장치)과 전력(전력/부하 불균형, 고속 밸빙 등)에 의한 동작이 우선될 수 있다. 터빈/보일러의 제어에는 보일러 추종과 터빈 추종에서부터 보일러/터빈 제어의 다양한 협조에 이르기까지 다양한 종류가 있다. 자동발전제어(AGC)는 발전기의 출력을 결정하여 조속기 또는 터빈 보일러 협조제어를 통하여 동작시킨다.

1차 에너지 시스템을 보다 단순화하고 신호의 명칭을 포함한 원동기 에너지 공급시스템의 기본 구조를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 1차 시스템의 입력은 계통

의 주파수, 발전기의 전기적 출력, 발전기 회전자의 각 속도, 발전기 전류 등이 있고 출력은 기계적 출력으로 발전기를 구동한다.

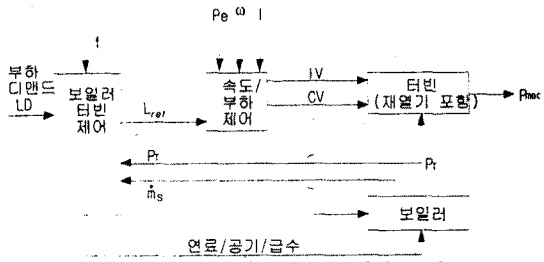

그림 2 원동기 에너지 공급시스템의 구성 요소

그림 2에서 터빈/재열기 블록을 보면 기계적 출력(Pmec)은 주증기압력(P_T)과 제어밸브(CV) 및 차단밸브(IV)의 함수로 정의된다. 그리고 보일러 블록을 보면 보일러는 주증기 압력(P_T)과 증기 이동속도($\dot{m}_s$)로 모델링 되며 CV와 연료/공기/급수의 함수로 표시된다. 재열기의 압력효과는 터빈 모델에 포함된다.

속도/부하 제어 블록은 다음과 같은 값들의 변화에 대하여 반응하는 터빈제어로직을 표현한다. 즉 부하 기준치(Lref), 속도(ω), 시작 압력조정기 이후의 주증기압력(P_T), 또는 고속밸빙인 경우 전기적 출력(Pe)와 발전기 전류(I)의 변화 등이 이에 해당한다.

보일러 터빈 제어 블록은 수동 또는 AGC에 의해 설정된 부하 디맨드에 따라 속도/부한 제어블록의 입력인 부하기준(Lref)을 만든다. 그 밖의 보일러 터빈 제어 블록의 입력 신호로는 플랜트 주파수(f), 주증기압력(P_T), 스팀속도($\dot{m}_s$)가 있다. 가장 간단한 형태로는 보일러와 터빈제어를 분리하고 출력변화는 직접 부하기준(Lref)을 거치는 것으로 하고 보일러 제어는 주증기압력(P_T)와 스팀속도($\dot{m}_s$)에 응답하는 것으로 한다.

3. 1차 에너지 시스템(TGOV5)모델 개발

PSS/E 프로그램에서 제공하는 1차 에너지 시스템 모델인 TGOV5 모델의 EMTDC용 모델 개발에 관하여 기술한다. TGOV5의 스팀터빈/보일러 모델은 조속기 동작과 고압-저압, 재열기 터빈과 보일러 효과를 포함하는 드럼형 1차 에너지계 모델로 구성되어있다. PSS/E 프로그램에서 제공하는 기본적인 제어 블록을 그림 4에 나타내었다. EMTDC용 TGOV5 모델을 개발하기 위해 그림 4의 기본 구조를 분석하여 EMTDC의 기본 라이브러리와 UDM 모델을 이용하여 개발한다. TGOV5 모델은 크게 조속기 모델, 연료 및 보일러 모델 그리고 압력지정 및 부하기준 제어 등의 3가지 부분으로 나누어 EMTDC용 제어기 모델을 개발한다. 다음에 제시되는 내용은 각 부분 모델 설명과 개발 결과를 나타낸다.

(a) TGOV5 모델의 조속기 모델

조속기 모델은 IEEEG1 모델과 유사하며 Tandem 및 Cross-compound 발전기에 적용가능 하도록 되어 있다. 밸브의 Limit에는 최대/최소치의 비율 Limit을 추가하도록 되어있고 스팀양은 기존 모델에서와 같이 밸브 위치에 따라 비례하지 않도록 Trottle 압력과 밸브 면적의 곱에 비례한다. 적절한 시정수와 이득(gain)을 선정하면 재열기와 중압, 저압 터빈의 효과 모델링이 가능하고 기타 조속기의 변수들로서 조속기의 부하기준, trottle 압력과 스팀양을 고려한다. 그림 3은 EMTDC 모델로 구현된 TGOV5의 조속기 모델 부분을 나타내고 있다.

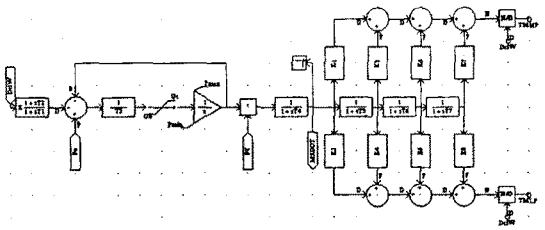

그림 3 TGOV5 모델의 조속기 부분

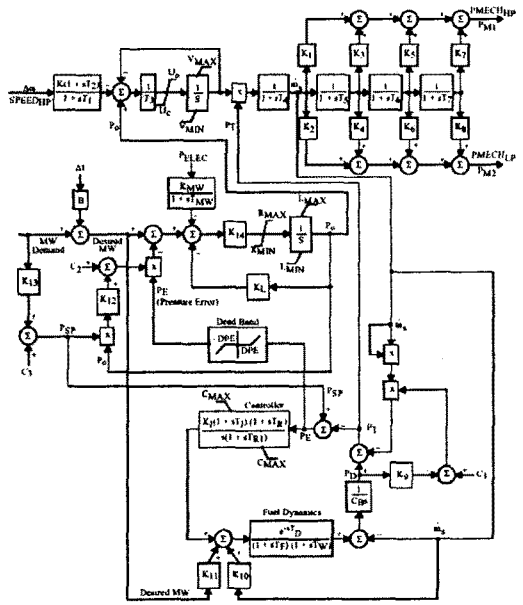

그림 4 PSS/E의 TGOV5 기본 제어도

(b) TGOV5 모델의 연료 및 보일러 부분

드럼 압력은 스팀 발생량에서 보일러로 빠져나간 스팀량의 적분치에 비례하고 Trottle 압력은 드럼 압력에서 과열기(Superheater)와 Steam lead간의 압력저하를 뺀 값이며 이러한 압력저하는 스팀압력의 제곱과 스팀밀도에 따라 변한다. 압력저하 계수는 보일러 압력의 함수로 나타내고 스팀 발생량은 보일러 입력(공기와 연료)의 제어로 이루어지며 3가지 모드 제어기를 사용한다. 스팀량 또는 MW 요구 신호로부터 스팀생산을 예상하도록 준비되고 3가지 모드 제어기들은 Non-windup Limit을 갖는데 연료/공기 제어가 수동으로도 가능하게 하며 2 모드 제어의 모델도 가능하다. 시간지연은 4차 근사 방정식으로 모델링하여 긴 시간지연에도 가능하도록 되어 있다. 그림 5는 EMTDC 모델로 구현된 TGOV5의 연료 및 보일러 모델 부분을 나타내고 있다.

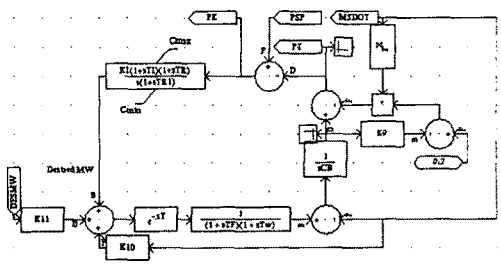

그림 5 TGOV5 모델의 연료 및 보일러 모델 부분

(c) TGOV5 모델의 압력지정 및 부하기준 제어

MW 요구량은 협조제어 전단에서 주파수 bias 및 압력에 의해 수정하도록 되어있다. 수정된 요구량 신호는 조정속도 제한(Limit)을 고려하여 부하기준 모터 위치를 조정한다. 부하요구 신호가 압력 지정값에 영향을 줄 가능성도 있다. MW 요구 신호를 수정하는 압력편차의 이득(gain)은 일정하게 하거나 (압력 지정값*부하기준)에 비례하도록 한다. MW 요구량신호는 변수로 저장할 수 있으며 AGC펄스에 의해 MW로 바꾸도록 외부 Logic을 첨가할 수 있다. 그림 6은 EMTDC 모델로 구현된 TGOV5의 압력지정 및 부하기준 제어 모델 부분을 나타내고 있다.

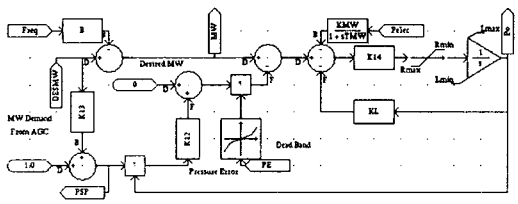

그림 6 TGOV5 모델의 압력지정 및 부하기준 제어

(d) EMTDC용 TGOV5 모델 구축

EMTDC용 1차 에너지계 모델인 TGOV5를 개발하기 위해 (a), (b) 그리고 (c) 부분의 입출력 신호를 고려하여 그림 7과 같은 전체적인 모델을 구축하였다. 그림 7에 나타난 TGOV5 모델은 GSTEP 시험을 위해 모델의 입출력 부분이 약간 수정이 되었지만 기본적인 모델의 기능과 특성은 PSS/E의 제어기 모델의 기본 기능과 동일하도록 구성되어 있다. 그림에서도 볼 수 있듯이 PSS/E 매뉴얼에서 제시된 제어블록 모양과 동일하게 CC(Controls Compiler)급으로 개발되었고 UDM 모델을 이용하여 동일한 제어기 파라미터 이름을 사용할 수 있도록 제어 블록들을 개발하였다. PSS/E에서 제시된 부분과 거의 동일하게 구성함으로써 개발된 제어기 모델을 사용하는 사용자 편이성을 도모하였다.

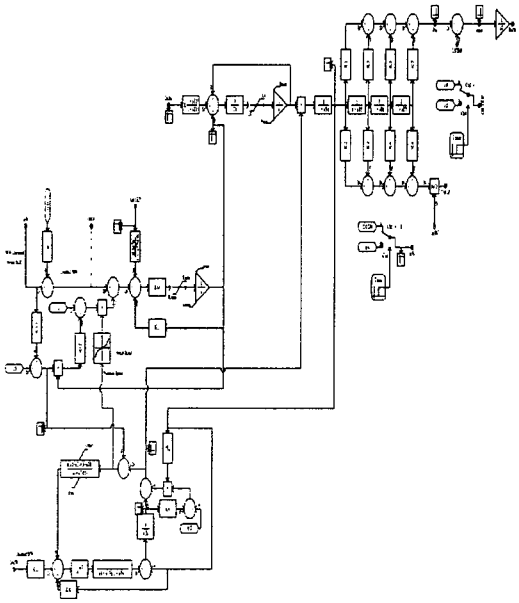

그림 7 EMTDC용 TGOV5 모델

4. GSTEP을 이용한 TGOV5 모델 검증

EMTDC용으로 개발된 TGOV5 모델은 큰 개념으로 생각하면 스팀/터빈의 동작을 한다. 즉 조속기 모델과 동일한 개념을 고려하여 TGOV5 모델의 검증은 조속기 모델 검증 방법에 사용된 Governor Step(GSTEP) 방법을 그대로 적용할 수 있다. 하지만 보일러 부분에 시정수가 크기 때문에 EMTDC 시뮬레이션 시 적절한 Time step(Δt)를 설정해서 시뮬레이션을 해야한다. 우선 기본적인 GSTEP 시험방법은 다음과 같다. GSTEP 방법은 시험계통을 이용하지 않고 조속기 모델(TGOV5 모델 포함) 자체만의 시험을 의미한다. 그러므로 다른 계통기기(발전기, 여자기)의 영향을 고려하지 않고 조속기만의 특성을 분석할 수 있다. GSTEP의 개념도를 그림 8에 나타내었다.

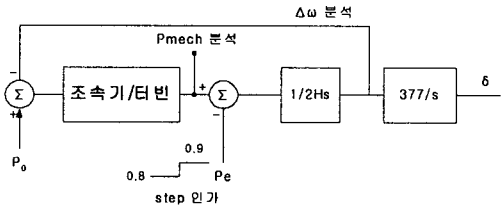

그림 8 Governor Step(GSTEP) 개념도

그림 8에서 볼 수 있듯이 Pe(Electrical Power)에 일정한 스텝을 인가하여 Pm(Mechanical Power)와 Δω의 변화를 통해 대상 모델의 특성을 분석한다. PSS/E와 달리 EMTDC에서는 조속기 모델만의 자체적인 초기화 과정이 존재하지 않으므로 EMTDC상에서 GSTEP을 모의할 경우 일정한 값(Pe=0.7pu)의 수렴과정 이후에 스텝을 인가하여 조속기 및 TGOV5 모델의 동작을 분석한다. TGOV5 모델의 경우 GSTEP 방법을 생각하면 스텝을 인가하기 전에 Pe값이 0.7에 수렴할 때까지의 Δω 값을 정하는 초기화 과정이 필요하다. 초기화 과정에서 TGOV5의 Pe값이 0.7(pu)에 수렴했을 경우 Δω 값은 0.0298(pu) 값이다. 즉 Δω 값이 0.0298(pu)에 수렴했을 때 Pe값의 스텝을 0.7(pu)에서 0.8(pu) 스텝을 인가하여 Pm과 Δω값의 응동 특성을 통해 PSS/E와 EMTDC 모의 결과를 비교하여 성능을 검증한다. 검증에 사용된 TGOV5 모델의 파라미터는 PSS/E 메뉴얼에서 제공되는 전형적인 데이터를 이용하였다.[5]

EMTDC용으로 개발된 TGOV5 모델의 경우 초기 정상상태(Pe=0.7)에 도달한 후 Pm의 값을 0.7(pu)에서 0.8(pu)로 GSTEP을 인가했을 때 30초 동안의 PSS/E 및 EMTDC의 시뮬레이션 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 제시되는 그림은 EMTDC 상의 MultiPlot을 이용하여 두 프로그램의 시험 결과를 비교하였다.

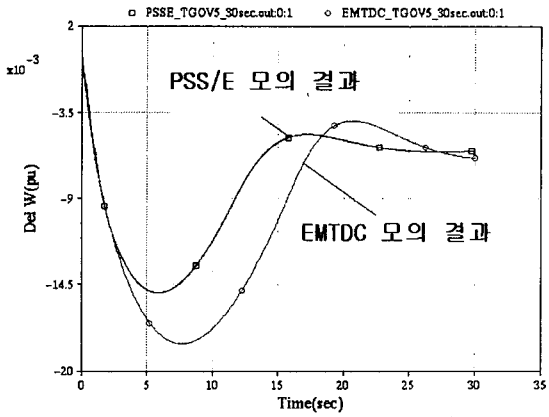

그림 9 GSTEP 시험 시 Δω의 응동 특성(30sec)

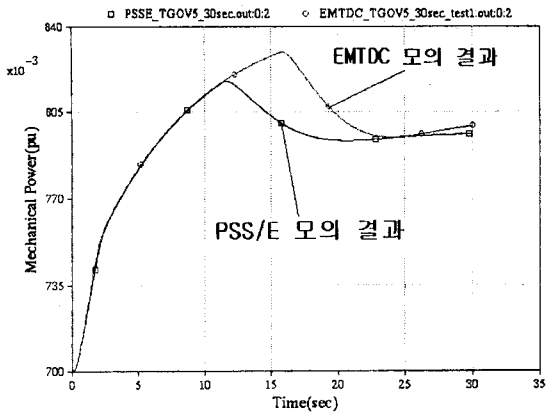

그림 10 GSTEP 시험 시 Pm의 응동 특성(30sec)

그림 9와 10에서 볼 수 있듯이 전체적인 응동 특성은 동일하지만 과도상태 영역에서 미소한 차이를 확인할 수 있다. 하지만 Y축 영역이 $\times 10^{-3}$(pu) 크기를 고려하면 동일한 결과를 확인 할 수 있다. 그림 9와 10에 나타난 미소한 차이는 다음의 수식을 이용하여 설명 할 수 있다. 우선 PSS/E 프로그램에서 사용되는 GSTEP은 식 1과 같은 동요방정식이 적용되었다.

$$2H\frac{d\omega}{dt} = \frac{Pm - D\cdot\omega}{1+\omega} - Pe \qquad \text{(식 1)}$$

반면에 EMTDC상 모의한 GSTEP에 구현된 동요방정식은 식 2와 같다. D(Damping ratio) 값을 0이라고 가정하면 식 1의 우변 분모 항에 (1+ω) 값이 반영됨을 알 수 있다.

$$2H\frac{d\omega}{dt} = Pm - Pe \qquad \text{(식 2)}$$

GSTEP을 인가한 후 다음 정상상태(Pe=0.8pu)까지 도달했을 경우 1500초 동안 모의하여 PSS/E 및 EMTDC 결과를 그림 11과 12에 각각 나타내었다. 그림 11과 12의 경우에는 TGOV5 모델의 보일러 시정수(C_B)가 200(sec) 정도이기 때문에 적절한 Δt의 설정과 시뮬레이션 시간(Finish Time)을 설정하기 위해 스텝인가 후 정상상태 도달 결과를 충분히 확인하기 위해 1500(sec) 시뮬레이션을 모의하였다.

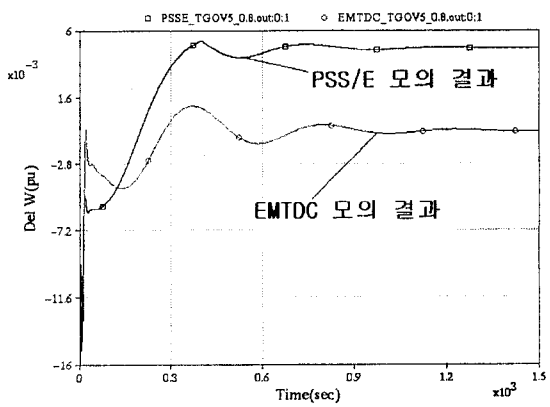

그림 11 GSTEP 시험 시 Δω의 응동 특성(1500sec)

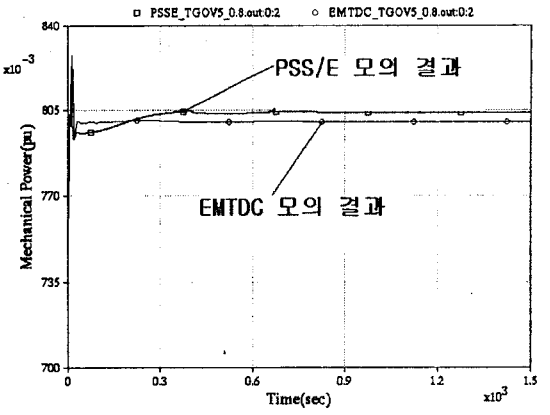

그림 12 GSTEP 시험 시 Pm의 응동 특성(1500sec)

그림에서 볼 수 있듯이 0.1(pu) 크기의 스텝을 인가한 후 과도특성 영역 후에 0.8(pu)의 정상상태 도달했을 때 거의 일치하는 응답 특성을 확인할 수 있다. 마찬가지로 PSS/E 및 EMTDC의 동요방정식의 구현에 있어 약간의 차이가 있지만 제어기 모델의 응답특성 관점에서 동일한 결과임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 한전계통의 안정도 해석 시 활용되고 있는 PSS/E 제어기 모델 중 보일러 특성을 포함하는 1차 에너지계 모델인 TGOV5 모델을 개발하였다. 제어기 모델 개발을 위해 개념적으로 구분된 조속기, 연료 및 보일러 부분 그리고 압력지정 및 부하기준 제어의 3가지 부분을 UDM 블록을 사용하여 CC(Controls Compiler)급 모델로 개발하였다. 또한 EMTDC용 제어기 모델 구현 시 파라미터 입력 및 제어블록의 동일한 구성을 적용하여 사용자 편이성을 도모하였다. EMTDC용 TGOV5 모델의 검증은 GSTEP 시험을 통하여 PSS/E 시뮬레이션 결과와 EMTDC 시뮬레이션 결과를 비교하여 개발된 모델의 적정성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 허진, 김동준, 윤재영, 문영환, 이진, 윤용범 "EMTDC용 IEEET3 여자기 모델 개발", 대한전기학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 123-125, 2001

[2] 허진, 김동준, 윤재영, 문영환, 이진, 윤용범 "EMTDC용 조속기 모델 개발 및 GSTEP을 이용한 검증", 대한전기학회 하계학술발표회 논문집, pp. 71-74, 2001

[3] "PSCAD/EMTDC User's manual", Manitoba HVDC Research Center, 1988

[4] "PSCAD/EMTDC Installation & Administration Manual", Manitoba HVDC Research Center, 1988

[5] "PSS/E-26 Program Application Guide", Power Technologies, Inc, 1999